

大气温度、湿度和压强对星载激光雷达测量 CO₂ 浓度精度的影响

谢杨易^{1,2} 刘继桥¹ 姜佳欣^{1,2} 陈卫标¹

(¹中国科学院上海光学精密机械研究所, 上海市全固态激光与应用重点实验室, 上海 201800)

²中国科学院大学, 北京 100049

摘要 研究了大气温度、湿度和压强的不确定性对于星载积分路径差分吸收(IPDA)激光雷达系统测量大气 CO₂ 柱线浓度精度的影响。介绍了测量大气 CO₂ 柱线浓度的基本原理和 CO₂ 吸收截面计算方法,理论分析并模拟计算了吸收峰(On-line)波段范围不同大气温度、湿度和压强的误差对于大气 CO₂ 柱线浓度反演精度的影响。对于给出的优化工作波长,在吸收峰波数为 6361.2250 cm⁻¹,吸收谷(Off-line)波数为 6360.99 cm⁻¹,温度不确定性为 1 K、湿度不确定性为 10%以及压强不确定性为 0.001 的条件下,综合导致的 CO₂ 柱线浓度测量误差为 0.296 × 10⁻⁶,为高精度反演大气 CO₂ 柱线浓度提供了重要参考数据。

关键词 遥感;CO₂ 浓度;积分路径差分吸收;星载激光雷达;测量误差

中图分类号 TN958.98

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201239.s214005

Effects of Atmosphere Temperature, Humidity and Pressure for a Space-Borne Lidar Measuring Atmosphere CO₂ Concentrations

Xie Yangyi^{1,2} Liu Jiqiao¹ Jiang Jiixin^{1,2} Chen Weibiao¹

(¹ Shanghai Key Laboratory of All Solid-State Laser and Applied Techniques, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract The influences of atmospheric temperature, humidity and pressure uncertainties on space-borne integrated path differential absorption (IPDA) lidar measuring atmospheric column-averaged CO₂ concentrations are studied. The column-averaged CO₂ concentrations measurement principle and CO₂ absorption cross section calculation method are presented. The influences of atmospheric temperature, humidity and pressure errors on retrieving CO₂ concentrations around on-line CO₂ absorption line are analyzed and simulations are implemented. For optimal IPDA lidar on-line and off-line wave number of 6361.2250 cm⁻¹ and 6360.99 cm⁻¹, the total column-averaged CO₂ concentration measurement error is calculated to be 0.296 × 10⁻⁶ with temperature error of 1 K, humidity error of 10% and relative pressure error of 0.001. The result is important for retrieval of column-averaged CO₂ concentration with high precision and lidar system parameters optimization.

Key words remote sensing; carbon-dioxide concentration; integrated path differential absorption; space-borne lidar; measurement error

OCIS codes 280.0280; 280.1910; 280.3640

1 引言

近年来,全球气候变暖等环境问题已日趋严重。

研究表明,以 CO₂ 为主的温室气体的大量排放是造成这种现象的主要原因^[1]。全球 CO₂ 浓度的高精

收稿日期: 2012-10-12; 收到修改稿日期: 2012-11-27

基金项目: 民用航天项目(1105231-CAO)资助课题。

作者简介: 谢杨易(1989—),男,硕士研究生,主要从事激光雷达技术方面的研究。E-mail: xieyangyi2007@163.com

导师简介: 陈卫标(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事空间激光器、激光雷达等方面的研究。

E-mail: wbchen@mail.shenc.ac.cn(通信联系人)

度时空分布测量,对于增强对全球碳循环的理解,研究 CO₂ 的源和汇,改善气候预报模型,提高灾害性天气(如干旱和洪水)预报准确率和环境研究等方面具有十分重要的意义。为了有效监测全球 CO₂ 源和汇,对于全球 CO₂ 流量变化探测,小于 1×10⁻⁶ 的 CO₂ 浓度测量精度是必须的。

为了实现全球范围 CO₂ 浓度测量,卫星有效载荷采用被动太阳光谱吸收技术或激光差分吸收光谱技术。被动太阳光谱吸收技术,需要利用太阳光,不能实现全天时测量,另外测量精度受大气气溶胶和云的干扰引起的测量误差很大,测量精度一般在 3~4×10⁻⁶。激光差分吸收光谱技术,能够满足全天时测量要求,基本不受气溶胶影响,在薄云条件下仍然可以工作,具有较高测量精度(小于 1×10⁻⁶)。

本文研究的 CO₂ 浓度测量星载激光差分吸收光谱技术,采用积分路径差分吸收(IPDA)方法,发射波长分别位于 CO₂ 吸收光谱的吸收峰和吸收谷的两束激光^[2],对发射激光功率进行定标,同时获取地面返回激光信号功率,结合吸收光谱数据,计算整个测量路径的 CO₂ 柱线浓度。为了精确反演大气 CO₂ 柱线浓度(相对干空气混合比),需要提供测量区域的大气温度和湿度剖面以及表面压力数据。本文将研究温度、湿度和压强数据的不确定性引入的 CO₂ 柱线浓度测量误差,为星载 IPDA 系统工作波长优化分析、系统参数优化设计以及 CO₂ 柱线浓度高精度反演提供了重要参考数据。

2 基本原理方法

2.1 CO₂ 柱线浓度测量原理

IPDA 激光雷达,发射两波长相近的激光,分别位于 CO₂ 谱线的吸收峰(On-line)和吸收谷(Off-line)附近,通过测量两发射激光功率以及地面回波信号功率,结合吸收光谱数据计算测量路径的 CO₂ 柱线浓度。

由差分吸收激光雷达方程^[3],可得

$$-2 \int_{\text{Gnd}}^{\text{Top}} \beta_{\text{air}} \bar{\rho} \Delta\sigma dr = \ln \frac{P(\lambda_{\text{on}}, R) P_0(\lambda_{\text{off}})}{P(\lambda_{\text{off}}, R) P_0(\lambda_{\text{on}})}, \quad (1)$$

式中 β_{air} 为大气分子数密度, $\bar{\rho}$ 为 CO₂ 柱线浓度, $\Delta\sigma$ 为差分吸收截面, $\Delta\sigma = \sigma_{\text{on}} - \sigma_{\text{off}}$, P_0 为发射信号功率, P 为回波信号功率。

定义权重函数 $W(p, T) = -\beta_{\text{air}} \Delta\sigma dr / dp$, 其中 P 为大气压强, T 为大气温度, 则(1)式可写为^[4]

$$\bar{\rho} \int_{\text{Gnd}}^{\text{Top}} W(p, T) dp = \frac{1}{2} \ln \frac{P(\lambda_{\text{on}}, R) P_0(\lambda_{\text{off}})}{P(\lambda_{\text{off}}, R) P_0(\lambda_{\text{on}})}, \quad (2)$$

由理想气体状态方程和流体静力学方程,可得

$$-\frac{dr}{dp} = \frac{RT}{\rho M g}, \quad (3)$$

式中 R 为普适气体常数, M 为空气摩尔质量, g 为重力加速度, 由(3)式可将权重函数简化为

$$W(p, T) = \frac{\Delta\sigma}{g m_{\text{air}}}, \quad (4)$$

式中 m_{air} 为一个空气分子平均质量, 令 $X_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水蒸气的干空气混合比, 则可得权重函数为

$$W(p, T) = \frac{\Delta\sigma}{g (m_{\text{dryair}} + m_{\text{H}_2\text{O}} X_{\text{H}_2\text{O}})}, \quad (5)$$

式中 m_{dryair} 为干空气分子平均质量, $m_{\text{H}_2\text{O}}$ 为水蒸气分子平均质量。由(2)式和(5)式可得

$$\bar{\rho} = \frac{1}{2} \ln \frac{P(\lambda_{\text{on}}, R) P_0(\lambda_{\text{off}})}{P(\lambda_{\text{off}}, R) P_0(\lambda_{\text{on}})} (m_{\text{dryair}} + m_{\text{H}_2\text{O}} X_{\text{H}_2\text{O}}) g \frac{1}{\int_{\text{Gnd}}^{\text{Top}} \Delta\sigma dp}. \quad (6)$$

对于 IPDA 激光雷达测量大气 CO₂ 浓度, 主要采用 1.57 μm 和 2 μm 波段。考虑水汽等的干扰影响, 选择基于 1.57 μm 波段的 IPDA 系统。1.57 μm 波段的 CO₂ 和 H₂O 吸收谱线光学厚度计算如图 1 所示, 为了减少水汽吸收干扰, 模拟计算中选择了优化的发射激光波数, 吸收峰波数为 6361.2250 cm⁻¹, 吸收率波数为 6360.99 cm⁻¹, 其中吸收峰波数偏离吸收峰中心约 0.0254 cm⁻¹。

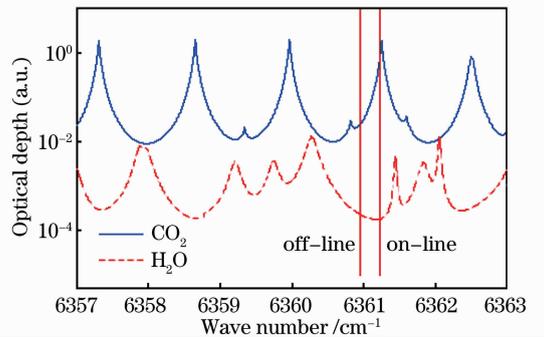


图 1 1.57 μm 波段 CO₂ 和 H₂O 大气光学厚度
Fig. 1 CO₂ and H₂O atmosphere optical depths in 1.57 μm spectral band

2.2 吸收截面计算方法

激光雷达发射的激光穿过大气层到达地面, 被 CO₂ 吸收而衰减, 不同波长的激光由于吸收截面不同而衰减不同, 可通过差分吸收截面计算差分光学厚度。对于路径长度为 L 的大气, 可根据 Beer-

Lambert 定律^[5]计算光学厚度：

$$D_0 = \int_0^L \theta(r) \sigma(\nu, r) dr, \quad (7)$$

式中 θ 为气体分子数密度, σ 为吸收截面, 与温度和波长有关。CO₂ 吸收谱线在大气中展宽, 主要为压力展宽和多普勒展宽, 分别由洛伦兹线型和多普勒线型表示。在低空大气中, 由于气压较大, 以压力展宽为主; 在高空大气中, 以多普勒展宽为主。综合二者的影响, 吸收截面 σ 可以用洛伦兹线型和多普勒线型的卷积, 即 Voigt 线型来拟合, 得到^[6]

$$\sigma(\nu) = \sigma_0 \frac{y}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{\exp(-t^2)}{y^2 + (x-t)^2} dt, \quad (8)$$

式中

$$\sigma_0 = \frac{S}{\gamma_D} \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}},$$

$$y = \frac{\gamma}{\gamma_D} \sqrt{\ln 2},$$

$$x = \frac{\nu - \nu_0}{\gamma_D} \sqrt{\ln 2},$$

式中 S 是谱线强度, 它是温度的函数, 表示为

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \exp\left[\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T_0} - \frac{1}{T}\right)\right], \quad (9)$$

式中 $S(T_0)$ 为 Hitran 数据库^[7] 给出的参考温度 T_0 下的谱线强度, T 为大气温度, Q 为振动转动函数, $\frac{Q(T_0)}{Q(T)}$ 可近似表示为 $\left(\frac{T_0}{T}\right)^j$, 对 CO₂, j 取 1.5, E'' 表示跃迁的低能态能级, h 为普朗克常量, c 为真空中的光速, k 为玻尔兹曼常数。

γ_D 是多普勒展宽线宽, 由下式计算：

$$\gamma_D = \left(2 \ln 2 \frac{k}{mc^2}\right)^{1/2} \nu_0, \quad (10)$$

式中 m 为 CO₂ 气体分子质量, ν_0 为被测气体吸收峰中心频率。

γ 是压力展宽线宽, 包含空气展宽和自身展宽, 由下式表示：

$$\gamma(p, T) = [\gamma_{\text{air}}(p - p_{\text{self}}) + \gamma_{\text{self}} p_{\text{self}}] \left(\frac{T_0}{T}\right)^n, \quad (11)$$

式中 γ_{air} 和 γ_{self} 分别为空气展宽系数和自身展宽系数, n 为温度指数, p 为大气总压强, p_{self} 为二氧化碳压强。

由于大气压的存在, 频率中心位置会发生漂移, 需要进行修正。用 Voigt 线型拟合分子吸收线, 吸收截面如图 2 所示, 计算 CO₂ 差分吸收截面以及差

分光学厚度。

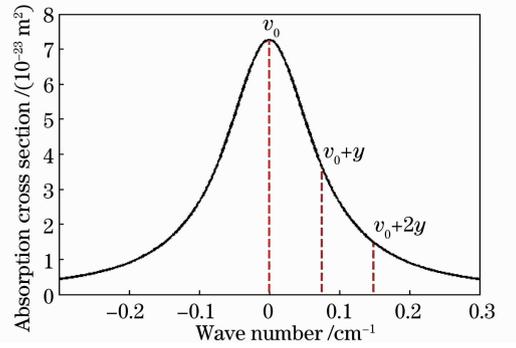


图 2 偏离吸收谱线中心不同波数的 CO₂ 吸收截面
Fig. 2 CO₂ absorption cross section at different wave numbers around central absorption line

3 模拟计算

3.1 大气温度影响

由(6)式可知, 反演的大气 CO₂ 浓度与吸收截面有关, 吸收截面是温度的函数, 因此大气温度不确定性会对 CO₂ 浓度的反演引入误差。大气温度受地域和天气影响大, 与理论模型偏差大。结合现有的卫星遥感设备温度剖面测量能力, 设定模拟计算中最大温度不确定性为 1 K。大气温度不确定性所产生的 CO₂ 浓度测量相对误差表示为

$$\epsilon_T = \frac{d\bar{\rho}}{\bar{\rho}} = \frac{d \int_{\text{Gnd}}^{\text{Top}} \Delta\sigma dp}{\int_{\text{Gnd}}^{\text{Top}} \Delta\sigma dp}. \quad (12)$$

将修正后温度 $T+dT$ 代入(8)式, 即可求得 ϵ_T 。对中心波数为 6361.2504 cm⁻¹ 的谱线求解温度误差, 可以得到温度不确定性为 0.5 K 和 1 K 时, CO₂ 柱线浓度相对误差和频率偏差的关系, 如图 3 所示。由图 3 可知中心频率处温度不确定性引入误差比稍微偏离中心处大。在中心频率外两个频率点温度误差较小, 且误差随温度的变化也较小, 称之为温度中立点^[4], 它们分别偏离中心 -0.89 GHz 和 0.67 GHz。由于压强产生频率漂移^[7], 两个温度中立点频率关于中心位置不对称。综合考虑其他影响因素, IPDA 激光雷达系统吸收峰波长选为 6361.2250 cm⁻¹, 偏离吸收线中心频率 -0.762 GHz, 在温度中立点附近。而吸收谷波长 CO₂ 光学厚度很小, 由温度不确定性引起的 CO₂ 光学厚度变化很小, 其影响可以忽略。选取图 1 中吸收峰和吸收谷波长, 1 K 的温度不确定性引入的 CO₂ 柱线浓度相对误差为 0.02%, 降低了温度灵敏度, 在 CO₂ 平均浓度 380 × 10⁻⁶ 时

绝对误差 0.076×10^{-6} 。

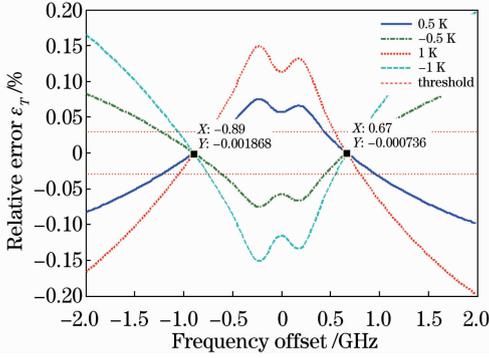


图 3 不同温度不确定性下 CO₂ 柱线浓度相对误差与频率偏差的关系

Fig. 3 Relationship between relative error of CO₂ column density and frequency offset under different temperature uncertainties

3.2 大气湿度影响

由 (6) 式可知, 测量的大气 CO₂ 柱线浓度 (相对

干空气混合比), 会由于水汽 (大气湿度) 的不确定性产生误差。湿度 X_{H_2O} 为水蒸气干空气混合比, 随环境变化大, 需要分析其对激光雷达系统反演 CO₂ 柱线浓度的影响。

由柱线浓度计算 (6) 式对 X_{H_2O} 求导可得大气湿度不确定度导致的 CO₂ 柱线浓度相对误差为

$$\epsilon_x = \frac{d\bar{\rho}}{\bar{\rho}} = \frac{m_{H_2O} dX_{H_2O}}{m_{dryair} + m_{H_2O} X_{H_2O}} \quad (13)$$

水汽主要分布在低空, 当湿度不确定度为 10%, 反演 CO₂ 柱线浓度时产生的相对误差 ϵ_x 为 0.041%, 在 CO₂ 平均浓度为 380×10^{-6} 时绝对误差 0.156×10^{-6} 。

3.3 大气压强影响

同大气温度一样, CO₂ 吸收截面是大气压强的函数, 压强的不确定性会对 IPDA 激光雷达系统测量 CO₂ 柱线浓度产生影响。由理想气体状态方程得到大气压强与高度的关系^[8]:

$$p(z) = \begin{cases} p_0 \left(1 - \frac{6.5z}{288.15}\right) \exp\left(\frac{gM}{6.5R}\right), & 0 < z \leq 11 \text{ km} \\ 0.2236 p_0 \exp\left(-\frac{z-11}{6.3422}\right), & 11 \text{ km} < z \leq 20 \text{ km} \\ 0.0541 p_0 \left(1 + \frac{z-20}{216.5}\right) \exp\left(-\frac{gM}{R}\right), & 20 \text{ km} < z \leq 30 \text{ km} \end{cases} \quad (14)$$

式中 z 是高度, p_0 是海平面的大气压强, 取 101325 Pa; M 是空气的摩尔质量, 取 28.96×10^{-3} kg/mol; T_0 是地表的温度, 取 288.15 K; R 取 8.314 J/(mol·K)。

由于吸收谷波数 CO₂ 光学厚度很小, 由压强不确定性引起的 CO₂ 光学厚度变化可以忽略, 仅考虑其对吸收峰波数的光学厚度影响。大气层内压强变化很大, 取压强不确定性比例系数为 δ_p ^[2], 将修正后压强 $p(1+\delta_p)$ 代入吸收截面公式, 计算压强不确定性导致的 CO₂ 柱线浓度反演相对误差。对中心波数为 $6361.2504 \text{ cm}^{-1}$ 的 CO₂ 吸收谱线, 计算压强不确定性分别为 0.00025, 0.0005 和 0.001 时其导致的 CO₂ 柱线浓度反演相对误差和频率的关系, 如图 4 所示。

从图中可以看出, 与温度不确定性导致的误差不同, 中心频率处压强不确定性导致的 CO₂ 柱线浓度误差最小。越偏离中心, 压强不确定性误差越大。所以在兼顾其他条件的同时, 应尽量使 IPDA 激光雷达系统吸收峰激光波长靠近 CO₂ 吸收峰中心, 以减小压强不确定性误差。采用图 1 中的吸收峰和吸

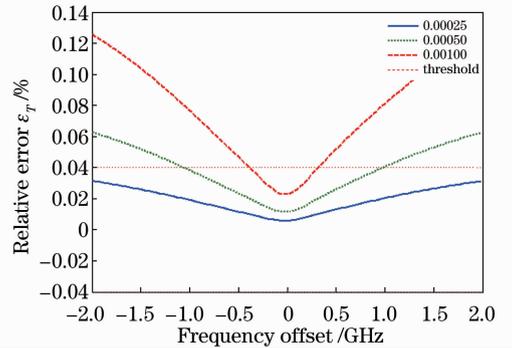


图 4 不同大气压强不确定性下 CO₂ 柱线浓度相对误差与频率偏差的关系

Fig. 4 Relationship between CO₂ column density relative error and frequency offset under different pressure uncertainties

收谷激光波长, 压强相对误差为 0.001 时的 CO₂ 柱线浓度相对误差为 0.063%, 在 CO₂ 平均浓度为 380×10^{-6} 时绝对误差为 0.24×10^{-6} 。

3.4 大气温度、湿度和压强总影响

大气温度、湿度和压强不确定性引起的误差互不相关, 三者导致的总误差即为三者平方和的根。

在吸收峰激光波数为 6361.2250 cm⁻¹，温度不确定性为 1 K、湿度不确定性为 10% 以及压强不确定性为 0.001 时，共同导致的 CO₂ 柱线浓度测量误差为 0.296 × 10⁻⁶，如表 1 所示。在星载 IPDA 系统测量中，随机误差^[4]主要来源于仪器噪声（包括光子噪声、探测器噪声、散斑噪声）和背景噪声^[9]等，对于 0.65 × 10⁻⁶ 的随机误差，大气温度、湿度和压强的不确定性共同导致的 CO₂ 柱线浓度误差为 0.296 × 10⁻⁶，能够满足最终反演 CO₂ 浓度 1 × 10⁻⁶ 的要求。

表 1 大气温度、湿度和压强不确定性导致综合系统误差

Table 1 Systematic errors induced by temperature, humidity and pressure uncertainties

Error source	Uncertainty	CO ₂ column density error / 10 ⁻⁶
Temperature	1 K	0.076
Humidity	10%	0.156
Pressure	0.001	0.240
Total		0.296

4 结 论

差分吸收激光雷达是高精度测量大气 CO₂ 浓度的有效方法，采用星载 IPDA 法能高精度测量全球大气 CO₂ 柱线浓度，理论上分析了基本测量原理以及 CO₂ 吸收截面的计算方法。对于星载 IPDA 激光雷达，反演大气柱线浓度需要同时提供测量区域大气温度、湿度和压强数据，理论研究了在吸收峰波段范围大气温度、湿度和压强的不确定性对于反演 CO₂ 柱线浓度的误差影响，开展了仿真模拟计算，对于优化的激光雷达工作波长，在温度不确定性

为 1 K、湿度不确定性为 10% 以及压强不确定性（相对误差）为 0.001 时，CO₂ 柱线浓度总测量误差为 0.296 × 10⁻⁶。为 IPDA 系统工作波长优化分析、系统参数优化设计以及 CO₂ 柱线浓度高精度反演提供了重要参考数据。

参 考 文 献

- 1 European Space Agency (ESA), "A-SCOPE-Advanced Space Carbon and Climate Observation of Planet Earth, Report for Assessment" [EB/OL]. <http://esamultimedia.esa.int/docs/SP1313-1-ASCOPE.pdf>, 2008
- 2 Jerome Caron, Yannig Durand. Operating wavelengths optimization for a space borne lidar measuring atmospheric CO₂ [J]. *Appl. Opt.*, 2009, **48**(28): 5413~5422
- 3 R. T. Menzies, M. T. Chahine. Remote atmospheric sensing with an airborne laser absorption spectrometer[J]. *Appl. Opt.*, 1974, **13**(12): 2840~2849
- 4 G. Ehret, C. Kiemle, M. Wirth *et al.*. Space-borne remote sensing of CO₂, CH₄, and N₂O by integrated path differential absorption lidar: a sensitivity analysis [J]. *Appl. Phys. B*, 2008, **90**(3-4): 593~608
- 5 David Crisp, Charles E. Miller, Philip L. DeCola. NASA orbiting carbon observatory: measuring the column averaged carbon dioxide mole fraction from space[J]. *J. Appl. Remote Sens.*, 2008, **2**(1): 023508
- 6 Syed Ismail, Edward V. Browell. Airborne and spaceborne lidar measurements of water vapor profiles: a sensitivity analysis[J]. *Appl. Opt.*, 1989, **28**(17): 3603~3615
- 7 L. S. Rothman, C. P. Rinsland, A. Goldman *et al.*. The HITRAN molecular spectroscopic database and Hawks (Hitran atmospheric workstation)[C]. *SPIE*, 1998, **3375**: 123~132
- 8 NOAA-S/T 76-1562. U. S. Standard Atmosphere, 1976 [S]. Washington: U. S. Government Printing Office, 1976
- 9 J. Caron, Y. Durand, J.-L. Bezy *et al.*. Performance modeling for A-SCOPE, a space borne lidar measuring atmospheric CO₂ [J]. *SPIE*, 2009, **7479**: 74790E

栏目编辑:何卓铭